مطالعه تجربی و تحلیلی دینامیک تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح مختلف

امیر کریم‌دوست یاسوری[۱] محمد پسندیده فرد[۲]

چکیده *در این تحقیق، دینامیک تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح با پسماند زاویه تماس مختلف، به صورت تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تبخیر سطحی قطرات آب بر روی سطوح، عموماً در سه مرحله صورت می‌گیرد: مرحله سطح تماس ثابت، مرحله زاویه تماس ثابت و مرحله ترکیب که در آن سطح تماس و زاویه تماس توامان کاهش می‌یابد. حل معادله حاکم بر نرخ تبخیر قطره به دلیل نامعلوم بودن وابستگی زاویه تماس دینامیکی و شعاع تماس به زمان در طی تبخیر قطره، دشوار است. مشاهدات تجربی انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که سطوح با پسماند بالا در بیشتر زمان تبخیر در مرحله سطح تماس ثابت قرار می‌گیرند و این در حالی است که قطره بر روی سطوح با پسماند پایین، در بیشتر مدت زمان تبخیر، فرآیند زاویه تماس ثابت را تجربه می‌کند. در ادامه مقاله، از این نتیجه استفاده شده و فرض می‌شود که کل فرآیند تبخیر بر روی سطوح با پسماند بالا و پایین در یک مرحله غالب صورت می‌گیرد و با استفاده از این فرض، معادله حاکم بر تبخیر قطره بر روی سطوح با پسماند بالا و پایین جداگانه و به صورت تحلیلی حل می‌گردد. هماهنگی بالایی بین نتایج به دست آمده از این تحلیل تئوری با داده‌های تجربی مشاهده می‌شود که اعتبار مدل تحلیلی پیشنهادی را تأیید می‌کند.*

واژه‌های کلیدی تبخیر سطحی قطره، پسماند زاویه تماس، قطره آب، مراحل تبخیر سطحی

Experimental and Theoretical Study of the Dynamics of Surface Evaporation of Water Droplets on Different Surfaces

A. Karimdoost-Yasuri M. Passandideh-Fard

Abstract *In this paper, the dynamics of evaporation of water droplets on surfaces with different contact angle hysteresis is studied experimentally and theoretically. The evaporation of water droplets on surfaces usually occurs in three distinct stages, namely the constant contact area mode, followed by the constant contact angle mode, and the mixed mode in which both contact angle and contact area are decreased. Due to the unknown nature of the time dependency of both the dynamic contact angle and contact radius, solving the governing equations for the evaporation rate of a droplet is complicated. The experimental observations performed in this study for the evaporation of sessile droplets on different solid substrates under various conditions shows that the surfaces with a high contact angle hysteresis remain more in the constant contact area mode. On the other hand, the surfaces with a low contact angle hysteresis remain more in the constant contact angle mode. Based on these observations, it is assumed that the entire process of evaporation on surfaces with high and low contact angle hysteresis occur in a dominated mode. Next, based on this assumption, the governing equation for the droplet evaporation for both surfaces is solved separately using a theoretical model. A good agreement is observed between the results of the theoretical analysis with those of the experiments; this confirms the validity of the proposed theoretical model.*

Key Words droplet evaporation, contact angle hysteresis, water droplet, evaporation modes

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۹/۲۶، اولین پذیرش آن در تاریخ ۹۱/۳/۳ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۱/٤/۳۱ به دفتر نشریه رسیده است.

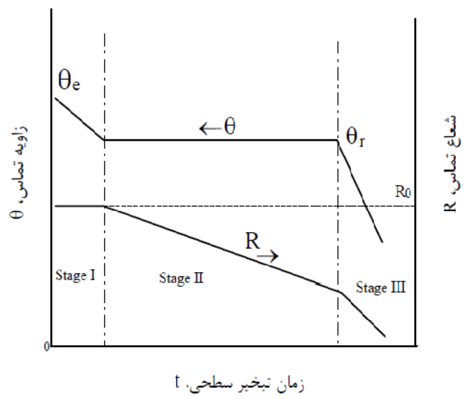
(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

فرآیند تبخیر قطره مایع دارای کاربردهای بسیاری در صنعت است که از جمله می‌توان به کاربرد آن در مهندسی پزشکی نظیر در یک ردیف قرار دادن و کشیدن مولکول‌های DNA [1,2]، و همچنین کاربرد آن در سیستم‌های سرمایش و تبادل حرارت اشاره کرد [3]. برای مثال فرآیندهای تغییر فاز (تبخیر و چگالش) از موضوعات اساسی لوله‌های میکروحرارتی (Micro-heat pipes) [4] و سرمایش اسپری تجهیزات الکترونیکی محسوب می‌شوند. فرآیند تبخیر بر رسوب ذرات کلوئیدی معلق در قطره در حال تبخیر نیز حاکم است که در مواردی نظیر پوشش‌دهی (Coating)، چاپ و رنگ دیده می‌شود [5-7]. امروزه، مهندسی بافت (Tissue engineering)، به کمک پرینترهای جوهر افشان (Inkjet) (بیوپرینت) و همچنین فرآیند خشک شدن جوهر در تولید مواد با کیفیت چاپ بالا از موضوعات اساسی در تحقیقات به شمار می‌رود [7-10]. از نقطه نظر علمی، مسأله تبخیر قطره به علت تکینگی (Singularity) شار تبخیر که ناشی از ناسازگاری شرایط مرزی در سه سطح مشترک است و هم‌چنین نامحدود شدن تنش لزجت در ناحیه سه‌فاز که ناشی از شرط مرزی عدم لغزش در سطح جامد است، از اهمیت قابل توجه‌ای برخوردار است. تماس قطره بر روی سطح در حالت تعادل با زاویه تماس تعادلی (Equilibrium contact angle) (θ_e) مشخص می‌شود. زاویه تماس به وجود آمده را در حین پخش شدن قطره بر روی سطح (و حرکت خط تماس به سمت فاز بخار)، زاویه تماس پیشروی (Advancing contact angle) (θ_a)، و در حین جمع شدن قطره (و حرکت خط تماس به سمت فاز مایع)، زاویه تماس پسروی (Receding contact angle) (θ_r)، می‌نامند. به اختلاف مقادیر زاویه تماس پیشرو و پسرو (θ_a–θ_r)، پسماند زاویه تماس (Contact angle hysteresis (CAH)) می‌گویند که به علت زبری و غیر یک‌نواختی سطح به وجود می‌آید. برای یک سطح واقعی سه زاویه فوق الذکر با هم برابر نیستند و رابطه $\theta_r < \theta_e < \theta_a$ همواره برقرار است.

تحقیقات نشان می‌دهد که در حضور پسماند زاویه تماس، مطابق شکل (۱)، سه مرحله را می‌توان برای فرآیند تبخیر قطره در نظر گرفت: اول مرحله‌ای که در آن قطره در سطح تماس ثابت از زاویه تماس تعادلی θ_e تا زاویه تماس پسرو θ_r، کاهش زاویه تماس می‌دهد (مرحله سطح تماس ثابت که در آن شعاع تماس ثابت می‌ماند). دوم مرحله‌ای که در آن قطره با زاویه تماس پسروی θ_r ثابت، کاهش شعاع تماس R می‌دهد (مرحله زاویه تماس ثابت) و مرحله سوم که با کاهش توأمان شعاع تماس R و زاویه تماس θ همراه است (مرحله ترکیب) [11-12].



شکل ۱ مراحل مختلف تبخیر سطحی قطره به صورت شماتیک

تحقیقات زیادی در زمینه تبخیر قطره بر روی سطح جامد موجود است. هو و لارسون [13] به صورت تجربی و تئوری نشان دادند که نرخ تبخیر خالص قطره نسبت به زمان برای زوایای تماس اولیه کوچک ($\theta<40^0$) تقریباً ثابت می‌ماند؛ حتی هنگامی که شار تبخیر در لبه قطره، تکینگی قوی‌تری را تجربه می‌کند. مجدداً هو و لارسون [14] در تحقیقی دیگر نشان دادند که تشکیل رسوب حلقه مانند که در لبه قطرات آب در حال خشک شدن مشاهده می‌شود نه

تنها ناشی از چسبیدن خط تماس به سطح است بلکه ناشی از جریان مارانگونی (Marangoni flow) نیز می‌باشد. الپرین و همکاران [15] با استفاده از بالانس ماده در سطح قطره، معادلاتی برای سرعت استفان و نرخ تغییر شعاع تماس با احتساب اثر جذب گاز محلول در سطح مشترک گاز / مایع به دست آوردند. آنها هم‌چنین شرایط مرزی را در سطح مشترک گاز / مایع با احتساب اثر جذب سطحی گاز غیرهم‌دما استخراج کردند. شهیدزاده و همکاران [16] نشان دادند که اگر تبخیر صرفاً ناشی از نفوذ (Diffusion) باشد رابطه $R(t)^2 \sim (t_e-t)$ برقرار است که در آن R(t) شعاع تماس در هر لحظه، t_e زمان کل تبخیر و t زمان است. کیم و همکاران [17] فرآیند تبخیر قطره بر روی سطوح پلیمری را با استفاده از تکنیک تحلیل تصویر دیجیتال (Digital image processing) مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که در فرآیند تبخیر آب، سه مرحله مجزا وجود دارد: مرحله سطح تماس ثابت، مرحله زاویه تماس ثابت و مرحله ترکیب که مستقل از مقدار اولیه قطره آب و خواص خیس‌شدگی سطوح پلیمر است. لی و همکاران[18] آزمایش‌هایی را بر روی پخش و تبخیر قطرات مایع نظیر هپتان و اکتان (Heptane & octane) بر روی سطوح جامد مختلف انجام دادند. آنها یک مدل تئوری توسعه دادند که یک رابطه کلی را برای تغییرات زمانی زاویه تماس، شعاع تماس و سرعت‌های پخش/ تبخیر می‌داد. شانفیلد و همکاران [19] تبخیر قطرات آب با شعاع تماس ثابت را مورد بررسی قرار دادند. آنها دو تقریب برای زوایای تماس کمتر از ۹۰ درجه ارایه کردند که پیش‌بینی دینامیک تبخیر را میسر ساخت. دان و همکاران [20] یک مدل ریاضی برای تبخیر شبه تعادلی قطرات مایع نازک با تقارن محوری و خط تماس ثابت ارایه کردند. کالینیچ و فرزانه [21] نشان دادند که قطرات کوچک آب، مراحل تبخیر متفاوتی را بر روی سطوح پلیمری شدیداً آب‌گریز (Super-hydrophobic) ($\theta_e \geq 150^0$) با پسماند زاویه تماس متفاوت از خود نشان می‌دهند. بدین ترتیب که تبخیر قطره بر روی سطوح با پسماند زیاد و کم به ترتیب، مرحله سطح تماس ثابت و زاویه تماس ثابت را دنبال می‌کند. شین و همکاران [22] مشخصه‌های تبخیر قطرات آب بر روی سطوح آب‌گریز (Hydrophobic) ($\theta_e>90^0$) و آب‌دوست (Hydrophilic) ($\theta_e<90^0$) را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برای سطوح شدیداً آب‌گریز، هیچ‌یک از سه مرحله مجزای تبخیر و مرحله سطح تماس ثابت مشاهد نمی‌شود و مشخصه‌های سطح، شدیداً نرخ تبخیر را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

معادله حاکم برای تبخیر قطره بر روی سطح به علت دارا بودن دو متغیر زاویه تماس (θ) و شعاع تماس (R) که خود تابعی از زمان هستند به‌طور مستقیم و بسته، غیرقابل حل است. در این تحقیق، با انجام آزمایش بر روی سطوح مختلف مشاهده می‌شود که فرآیند تبخیر قطرات آب بر روی سطوح با پسماند بالا در بیشتر زمان تبخیر، در سطح تماس ثابت، صورت می‌گیرد (یعنی مطابق شکل (۱) مدت زمان مرحله اول برای این سطوح بسیار بیشتر از مراحل دیگر است). این در حالی است که قطرات آب بر روی سطوح با پسماند پایین در بیشتر زمان تبخیر، در زاویه تماس ثابت، کاهش حجم می‌دهند (یعنی مطابق شکل (۱) مدت زمان مرحله دوم برای این سطوح بسیار بیشتر از مراحل دیگر است)؛ که با نتایج تجربی محققان دیگر هم مطابقت دارد [17,21,23-27]. بنابراین در ادامه فرض می‌شود که تبخیر قطرات آب بر روی سطوح با پسماند بالا و پایین، صرف نظر از دو مرحله دیگر تبخیر، در یک مرحله به ترتیب در سطح تماس ثابت و زاویه تماس ثابت صورت می‌گیرد. با این ایده، معادله حاکم بر تبخیر قطره برای هریک از این دو سطح، به‌طور جداگانه و به صورت تحلیلی، حل می‌شود. نتایج تحلیلی سپس با نتایج تجربی

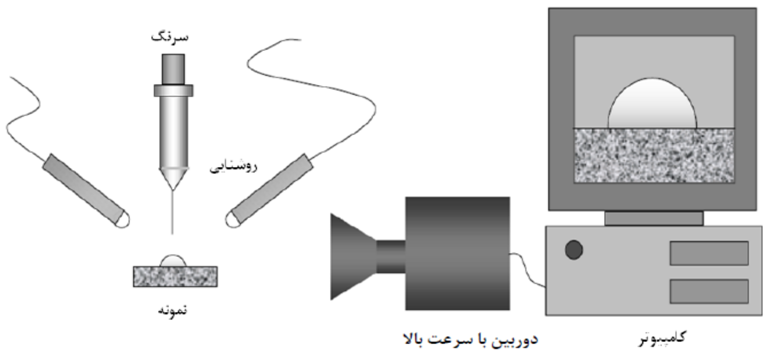
مختلف مقایسه شده و مدل ارایه شده اعتبارسنجی می‌شود.

بررسی تجربی پدیده تبخیر سطحی یک قطره

کارهای تجربی و مراحل آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. نحوه چیدمان وسایل آزمایش در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصات لوازم و تجهیزات آزمایش در جدول (۱) و شرایط آزمایش‌های انجام شده در جدول (۲) آورده شده‌اند.

برای انجام آزمایش، ابتدا سطوح جامد مورد نظر کاملاً شسته شد تا آلودگی از سطح آنها پاک شود. با استفاده از سرنگ مقداری از قطره آب را روی سطح گذاشته شده و تصاویر قطرات در حال تبخیر با یک دوربین CCD (Charged-coupled device camera) با یک تصویر در ۳۰ ثانیه ضبط می‌شوند. از یک منبع نوری که بر روی تکیه‌گاه افقی قرار دارد برای دقت بالاتر اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود.

دوربین به یک رایانه متصل است که عکس‌های گرفته شده در آن ذخیره می‌شود. در نهایت با استفاده از نرم افزار تحلیل تصویر "ImageJ" [28]، شعاع تماس قطره و زاویه تماس آن نسبت به زمان مطابق شکل (۳) به دست می‌آید.



شکل ۲ شماتیکی از تجهیزات آزمایش در تحقیق حاضر

جدول ۱ مشخصات لوازم و تجهیزات آزمایش

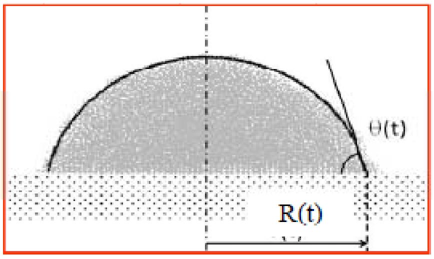
نام وسیله	ملاحظات
دوربین سرعت بالا	Camera Model: GRAS-03K2M/C, 1/3" KAI 0340D CCD, 648×488, 200 fps
لنز دوربین	Lens Model: TEC-M55
سرنگ آزمایش	میکرولیتر
سطح جامد مورد آزمایش	پلکسی گلاس (Plexiglas) ، تفلون، آلومینیوم
مایع مورد آزمایش	آب
دماسنج	جیوه‌ای

جدول ۲ شرایط انجام آزمایش

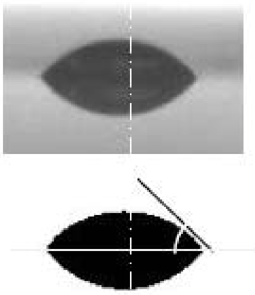
سطح	حجم قطره (mm^3)	رطوبت نسبی (٪)	دما (°C)
پلکسی گلاس	۰/۲۷۷	۷۵	۱۰
تفلون	۰/۱۸۰	٤۷	۲۷
آلومینیوم	۰/۳۲۰	٦۳	۲۰

مقادیر غلظت بخار در سطح قطره $c_s = 2.08\times10^{-2}\ kg/m^3$ و ضریب نفوذ معادل $D = 24.6\times10^{-6}\ m^2/s$ فرض می‌شود [24]. نحوه به دست آوردن زاویه تماس و شعاع تماس قطره به این ترتیب است که با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر در رایانه با یک سری عملیات از جمله کانتراست (Contrast)، ترشهولد (Threshold) و بزرگ کردن تصویر می‌توان زاویه و شعاع تماس را اندازه‌گیری کرد (شکل ٤ را ببینید).

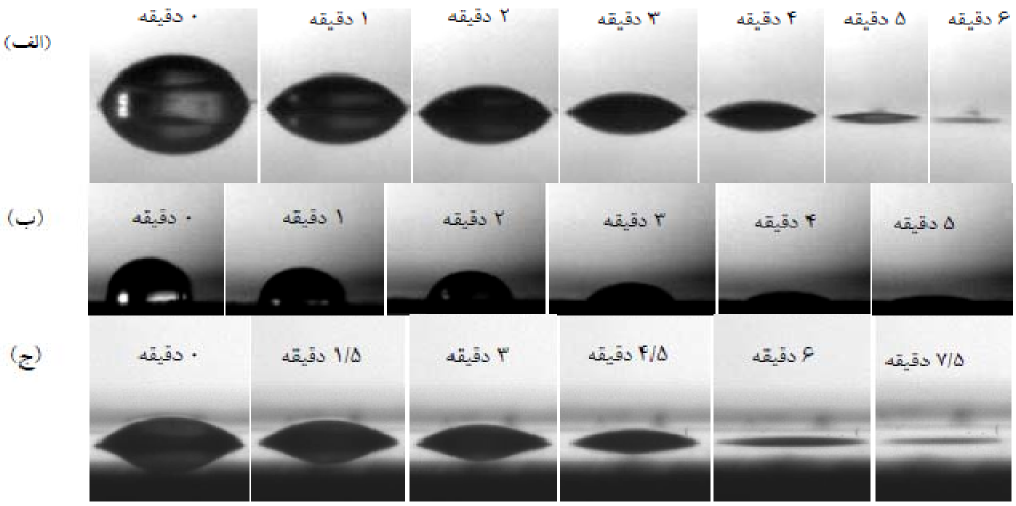
در ادامه این قسمت، نتایج تجربی تحقیق حاضر ارایه می‌گردد. شکل (۵) تصاویر قطره آب بر روی سطوح پلکسی گلاس، تفلون و آلومینیوم را از لحظه تماس قطره بر روی سطح تا لحظه ناپدید شدن آن نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج زیر قابل تکرار بوده و با تکرار آزمایش، تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.



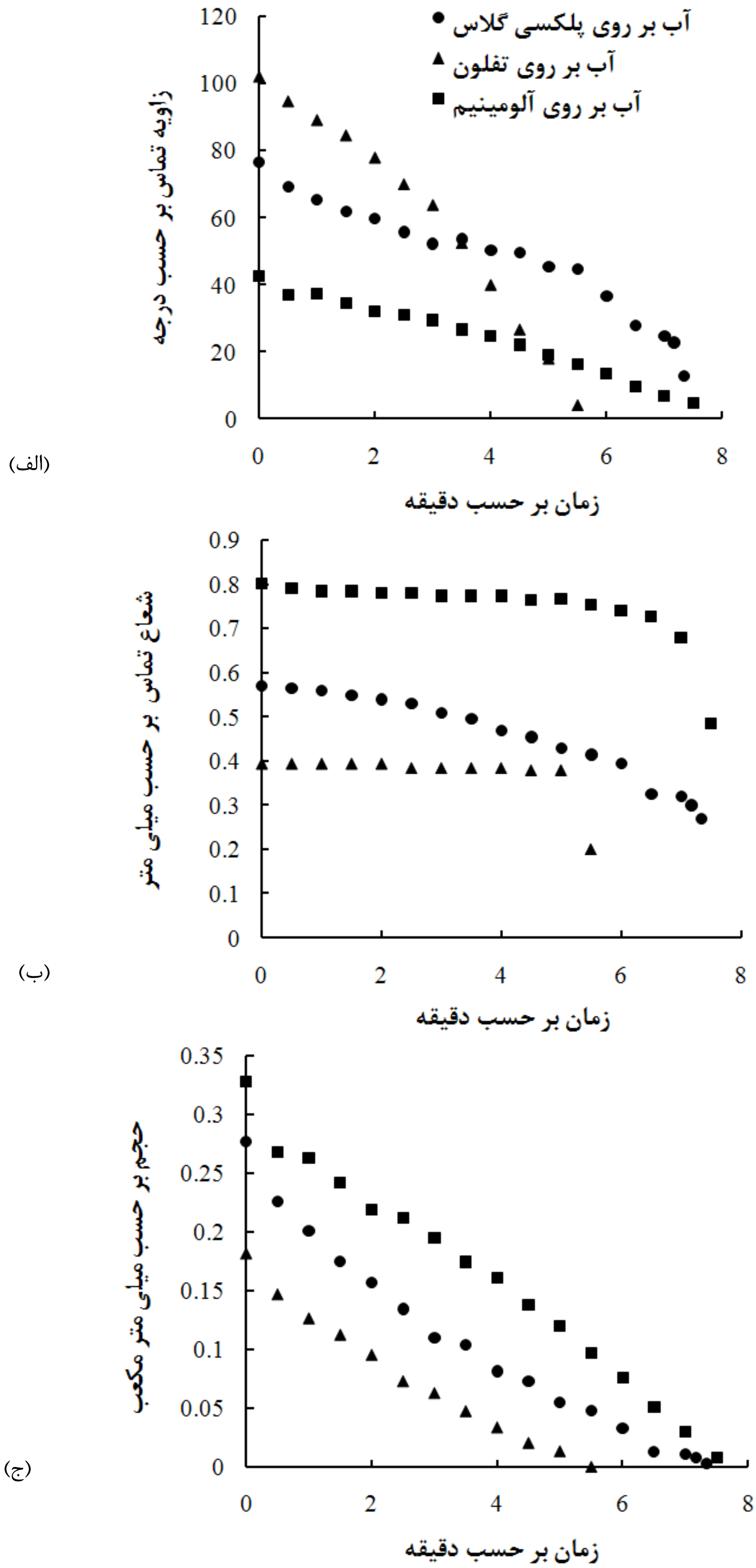
شکل ۳ نمایشی از شعاع و زاویه تماس قطره

(الف)
(ب)


شکل ٤ نمونه‌ای از الف) تصویر واقعی قطره بر روی سطح پلکسی گلاس ب) تصویر آن بعد از انتقال به نرم افزار پردازش تصویر



شکل ۵ تصویر قطره آب در حال تبخیر بر روی الف) سطح پلکسی گلاس، ب) سطح تفلون و ج) سطح آلومینیوم



شکل ٦ آهنگ تغییرات الف) زاویه تماس، ب) شعاع تماس و ج) حجم قطره نسبت به زمان برای یک قطره آب بر روی سطوح جامد پلکسی گلاس، تفلون و آلومینیوم

نمودار تغییرات زاویه تماس، شعاع تماس و حجم قطره آب بر روی سطوح پلکسی گلاس، تفلون و آلومینیوم نسبت به زمان در شکل (٦) نشان داده شده است. ماکزیمم درصد خطای نسبی برای زاویه تماس بر روی سطوح پلکسی گلاس، تفلون و آلومینیوم به ترتیب برابر ۱۰/۷٪، ٤/٦٪ و ۸/۸٪ ، برای شعاع تماس به ترتیب برابر ۷/٦٪، ٤/٥٪ و ۳/۹٪ و برای حجم قطره به ترتیب برابر ٦/٥٪، ۲/۳٪ و ٥/۱٪ به دست آمد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، قطرات آب بر روی سطوح تفلون و آلومینیوم که دارای پسماند بالا هستند، در بیشتر زمان تبخیر، در حالت سطح تماس ثابت قرار می‌گیرند (شکل ٦ -ب)؛ یعنی مدت زمان مرحله اول تبخیر برای این سطوح بسیار بیشتر از مراحل دیگر است. این در حالی است که قطرات آب بر روی سطوح با پسماند پایین نظیر پلکسی گلاس در بازه‌های زمانی مشخصی حین تبخیر، رفتار زاویه تماس ثابت را نیز تجربه می‌کنند (شکل ٦ -الف)؛ یعنی مدت زمان مرحله دوم برای این سطوح نسبت به مراحل دیگر قابل توجه است. این طور به نظر می‌رسد که برای سطوح با پسماند بسیار بالا و بسیار پایین، می‌توان کل فرآیند تبخیر قطره را با صرف نظر کردن از مراحل دیگر تبخیر، در یک مرحله غالب به ترتیب سطح تماس ثابت و زاویه تماس ثابت در نظر گرفت. بنابراین با استفاده از این دو رفتار متفاوت قطره بر روی سطوح با پسماند بالا و پایین در ادامه این مقاله به ارایه یک مدل تحلیلی برای تبخیر سطحی قطره پرداخته می‌شود.

بررسی تحلیلی پدیده تبخیر سطحی یک قطره

معادله حاکم. در پدیده تبخیر قطره بر روی سطح جامد، فرض می‌شود که انتقال جرم بخار، به وسیله جابه‌جایی آزاد که به دلیل اختلاف چگالی هوای مرطوب و خشک ایجاد می‌گردد بسیار کمتر از انتقال جرم ناشی از نفوذ (Diffusion) باشد. تأثیر سرمایش تبخیری قطره بر روی نرخ تبخیر نیز صرف نظر می‌شود. بنابراین، در این حالت، انتقال بخار در اصل به وسیله پخش ناشی از نفوذ بخار آب در هوا صورت می‌گیرد و به وسیله زمان نفوذ $t_d=R^2/D$، مشخص می‌شود که در آن R و D به ترتیب شعاع تماس قطره و ضریب نفوذ هستند. پیکنت و بکسون [29] با این فرضیات نرخ تبخیر قطره را به صورت معادله زیر توصیف کردند [24,29-34].

$$\frac{dV}{dt}=-2\pi\frac{D}{\rho}.(c_s-c_o).F(\theta).R \qquad (1)$$

در این رابطه $F(\theta)$ به‌صورت زیر ارایه شده است [24]:

$$F(\theta)=\frac{\sin\theta}{2(1+\cos\theta)}+2\int_0^\infty\frac{1+\cosh 2\theta\tau}{\sinh 2\pi\tau}\tanh[(\pi-\theta)\tau]d\tau \qquad (2)$$

و $c_0=\Phi c_s$ که در آن Φ رطوبت نسبی محیط است. در رابطه (۱)، V حجم قطره، ρ چگالی قطره، t زمان، θ زاویه تماس دینامیکی، c_s غلظت بخار اشباع در سطح قطره و c_o غلظت بخار در هوای محیط است.

از آن جا که زاویه تماس و شعاع تماس قطره در طی فرآیند تبخیر نسبت به زمان تغییر می‌کند، حل معادله (۱) به طور مستقیم دشوار است و نیاز به معادلات بیشتری بین کمیت‌های درگیر نظیر R، θ و V است.

فویستر [35] نشان داد که برای قطره‌های به اندازه کافی کوچک، یعنی دارای شعاع کمتر از طول موئینگی (Capillary length) می‌توان از پخش مولکولی و گرانش صرف نظر کرد و از تقریب قطره به صورت بخشی از یک کره استفاده کرد. طول موئینگی به صورت $L=\sqrt{\gamma/\rho g}$ تعریف می‌شود [35] که در آن γ کشش سطحی، ρ چگالی و g شتاب گرانش است. برای

قطرات آب، طول موئینگی در حدود ۲/٦mm به دست می‌آید. با استفاده از روابط هندسی، حجم قطره به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$V=\frac{\pi R^3}{3}\left(\frac{\cos^3\theta-3\cos\theta+2}{\sin^3\theta}\right) \qquad (۳)$$

با اضافه شدن معادله (۳)، هم‌چنان تعداد معادلات برای حل تبخیر قطره بر روی سطح کافی نیستند و نیاز به فرضیات ساده کننده دیگری دارند. در ادامه با استفاده از رفتار قطره بر روی سطوح با پسماند بالا و پایین که در طی آن یکی از دو کمیت R یا θ تقریباً ثابت می‌ماند، به حل معادله حاکم پرداخته می‌شود.

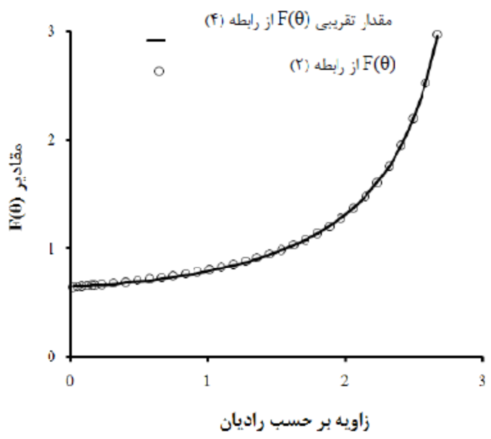
مدل تحلیلی تبخیر سطحی یک قطره بر روی سطوح با پسماند بالا. در این بخش با حل معادله (۱)، یک مدل تحلیلی برای تبخیر سطحی یک قطره بر روی سطوح با پسماند بالا ارایه می‌شود. ابتدا برای سادگی، با محاسبه مقادیر تابع F(θ) از معادله (۲)، رابطه تقریبی زیر از طریق برازش نمودار (Curve fitting) برای آن پیشنهاد می‌شود:

$$F(\theta)\approx\frac{1}{1.5458-0.2769\theta^{1.5}} \qquad 0\le\theta\le 3 \qquad (٤)$$

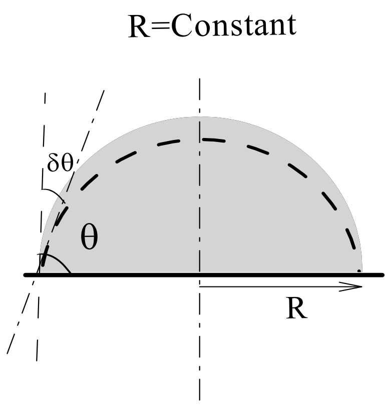
که در آن θ بر حسب رادیان است؛ برای مقایسه دقت رابطه تقریبی ارایه شده، مقادیر F(θ) نسبت به این تابع در شکل (۷) آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه تقریبی ارایه شده به خوبی مقادیر F(θ) را پیش‌بینی می‌کند؛ حال به حل معادله حاکم بر تبخیر قطره بر روی سطح با پسماند بالا پرداخته می‌شود.

همان‌طور که بیان شد، در این حالت فرض می‌شود، کل فرآیند تبخیر قطره در یک مرحله صورت می‌گیرد که در طی آن، قطره بر روی سطح می‌چسبد و صرفاً با کاهش زاویه تماس، کاهش حجم می‌دهد (شکل (۸) را ببینید).



شکل ۷ مقایسه مقادیر F(θ) از رابطه (۲) نسبت به رابطه تقریبی (٦)



شکل ۸ مکانیسم تبخیر قطره بر روی سطح با پسماند بالا؛ قطره با کاهش زاویه تماس، کاهش حجم می‌دهد.

در نتیجه $\frac{dR}{dt}=0$ و از رابطه (۳) می‌توان نوشت:

$$\frac{dV}{dt}=\frac{dV}{d\theta}\cdot\frac{d\theta}{dt}=\frac{\pi R^3}{(1+\cos\theta)^2}\frac{d\theta}{dt} \qquad (۵)$$

با برابری دو رابطه (۵ و ۱) نرخ زاویه تماس به دست می‌آید:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{G(\theta)}{\tau} \qquad (۶)$$

که در آن $G(\theta)$ به کمک رابطه (۴) تابعی بر حسب زاویه تماس به صورت زیر است:

$$G(\theta) = \frac{2(1+\cos\theta)^2}{1.5458 - 0.2769\theta^{1.5}} \qquad (۷)$$

و τ را به صورت ثابت زمانی تبخیر تعریف می‌کنیم:

$$\tau = \frac{\rho R^2}{D(c_s - c_0)} = \frac{\rho R^2}{Dc_s(1-\Phi)} \qquad (۸)$$

که در آن R شعاع تماس اولیه قطره بر روی سطح است. از رابطه (۶) می‌توان کل زمان تبخیر را به صورت زیر به دست آورد:

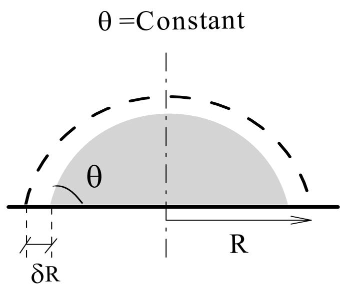
$$\frac{t_{e,h}}{\tau} = -\int_{\theta_e}^{0} \frac{d\theta}{G(\theta)} \approx \frac{1}{16\exp(-\theta_e) - 0.8224} \qquad (۹)$$

که در آن ابتدا مقادیر انتگرال با استفاده از نرم افزار Maple محاسبه شده و سپس با استفاده از برازش نمودار، رابطه (۹) برای آن ارایه شده است. نماد e و h به ترتیب به فرآیند تبخیر (Evaporation) و پسماند بالا (High hysteresis) اشاره دارد. زاویه تماس تعادلی θ_e در این رابطه بر حسب رادیان بوده و فرض شده است زاویه تماس قطره تا تبخیر کامل به زاویه تماس صفر میل می‌کند.

مدل تحلیلی تبخیر سطحی یک قطره بر روی سطوح با پسماند پایین. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این حالت، فرض می‌شود قطره کل فرآیند تبخیر را در یک مرحله طی کند که در طی آن قطره بر روی سطح در زاویه تماس ثابت، می‌لغزد (شکل (۹) را ببینید).

چون فرآیند در زاویه تماس پسروی ثابت θ_r=constant صورت می‌گیرد؛ در نتیجه $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$ و از رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\left.\frac{dV}{dt}\right|_{\theta_r=\text{constant}} = \frac{dV}{dR}\cdot\frac{dR}{dt} = \pi R^2 \frac{2-3\cos\theta_r+\cos^3\theta_r}{\sin^3\theta_r}\cdot\frac{dR}{dt} \qquad (۱۰)$$



شکل ۹ مکانیسم تبخیر قطره بر روی سطح با پسماند پایین؛ قطره در زاویه تماس پسروی ثابت، می‌لغزد.

با برابری دو رابطه (۱۰ و ۱)خواهیم داشت:

$$R\frac{dR}{dt} = -\frac{2\sin^3\theta_r}{(2-3\cos\theta_r+\cos^3\theta_r)(1.5458-0.2769\theta_r^{1.5})}\,\frac{D(c_s-c_0)}{\rho} \qquad (۱۱)$$

با حل معادله (۱۱)، وابستگی شعاع تماس به زمان به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{R}{R_0} = \sqrt{1 - H(\theta_r)(\frac{t}{\tau})} \qquad (۱۲)$$

که در آن $H(\theta_r)$ تابعی از زاویه تماس پسرو بوده و به صورت زیر است:

$$H(\theta_r) = \frac{4\sin^3\theta_r}{(2-3\cos\theta_r+\cos^3\theta_r)(1.5458-0.2769\theta_r^{1.5})} \qquad (۱۳)$$

نکته‌ای که در این جا باید توجه شود این است که قطره در زاویه تماس پسروی (θ_r) که کمتر از زاویه تماس تعادلی(θ_e) است، می‌لغزد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای وابستگی شعاع تماس بی‌بعد (R/R_0) نسبت به زمان بی‌بعد (t/τ) یک رابطه کلی به دست می‌آید که صرفاً به زاویه تماس بستگی دارد. از رابطه (۱۲) می‌توان زمان کل تبخیر قطره را نیز به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{t_{e,\ell}}{\tau}=\frac{1}{H(\theta_r)} \approx \frac{1}{16\exp(-\theta_r)-0.8224}+0.08\sin(\pi-\theta_r) \quad (۱٤)$$

که در آن رابطه تقریبی ارایه شده با برازش مقادیر واقعی به دست آمده و نماد ℓ به پسماند پایین (Low hysteresis) اشاره دارد. اگر از جمله دوم رابطه (۱٤) صرف نظر کنیم، نتیجه جالبی به دست می‌آید؛ به این ترتیب که در صورتی که زاویه تماس تعادلی با زاویه تماس پسروی یک سطح جامد با هم برابر باشد (یعنی سطح ایده‌آل که پسماند زاویه تماس آن صفر است)، زمان کل تبخیر پیش‌بینی شده از رابطه (۹) با زمان کل تبخیر پیش‌بینی شده از رابطه (۱٤) معادل به دست می‌آید و دو رابطه به نتیجه یکسانی منجر می‌شود. این نتیجه به نوعی اعتبار روابط ارایه شده را تأیید می‌نماید و بیان می‌کند که پسماند زاویه تماس دلیل رفتار متفاوت قطره بر روی سطوح مختلف است.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل تحلیلی. برای ارزیابی صحت و بررسی دقت روابط توسعه داده شده، مقایسه‌ای بین مقادیر به دست آمده از این تحقیق با مقادیر تجربی موجود صورت می‌گیرد. جدول (۳) مشخصات سطوح در نظرگرفته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد.

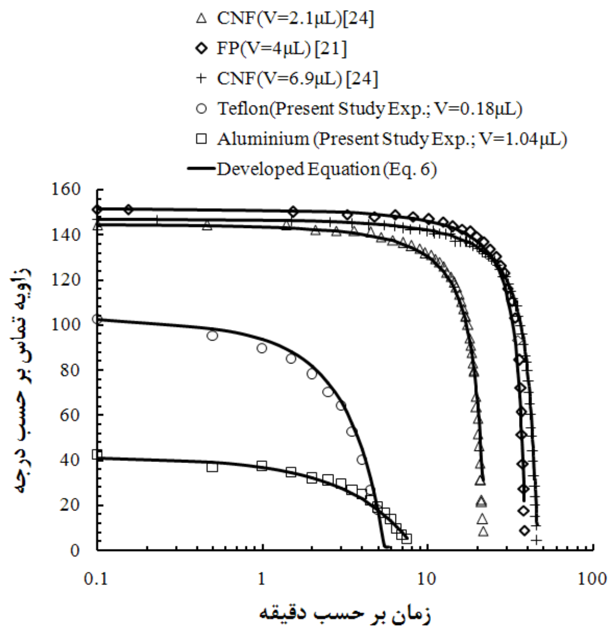
شکل (۱۰) آهنگ تغییر زاویه تماس بر روی سطوح با پسماند بالا را از لحظه تماس قطره بر روی سطح تا لحظه ناپدید شدن نشان می‌دهد. همچنان که قبلاً ذکر شد در تبخیر سطحی قطره روی این سطوح، شعاع تماس ثابت می‌ماند.

جدول ۳ خواص سطوح در نظر گرفته شده برای مقایسه نتایج تجربی و مدل تحلیلی

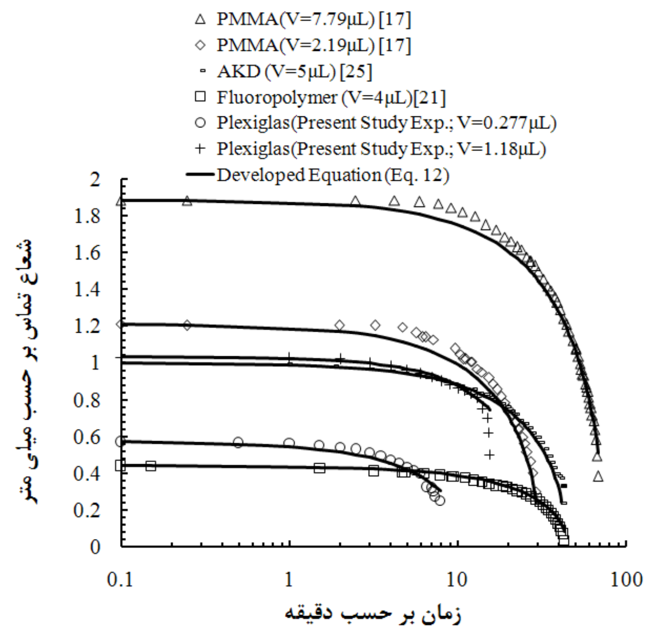
سطح	مرجع
Plexiglas پلکسی گلاس	تحقیق حاضر
Teflon تفلون	تحقیق حاضر
Aluminum (Al) آلومینیوم	تحقیق حاضر
Carbon nanofiber (CNF) کربن نانوفیبر	۲٤
Poly methylmethacrylate (PMMA) پلی متیل متاکرلیت	۱۷
Poly α-methyl styrene (PAMS) پلی متیل استیرن	۱۷
Epoxy Resin (ER) رزین اپوکسی	۲۷
Alkylketene dimmer (AKD) دیمر آلکیلکتن	۲۲
Fluoropolymer (FP) فلوئوروپلیمر	۲۱
Glass and Slide Glass (Glass & SG) شیشه و شیشه آزمایش	۱۳، ۲۲

شکل (۱۱) آهنگ تغییر شعاع تماس بر روی سطوح با پسماند پایین را از لحظه تماس قطره بر روی سطح تا لحظه ناپدید شدن نشان می‌دهد. در مورد این سطوح، زاویه تماس در طول تبخیر تغییر نمی‌کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود هماهنگی خوبی بین نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی ارایه شده با مقادیر تجربی وجود دارد و مدل توانسته آهنگ تغییر شعاع و زاویه تماس را نسبت به زمان پیش‌بینی کند.



شکل ۱۰ آهنگ تغییر زاویه تماس قطره نسبت به زمان بر روی سطوح با پسماند بالا؛ آزمایش بر روی سطح CNF در دو حجم اولیه مختلف قطره آب صورت گرفته است .علایم و خطوط پر رنگ به ترتیب به داده‌های تجربی (نتایج این تحقیق و نتایج دیگران) و رابطه (٦) از تحقیق حاضر اشاره دارد.



شکل ۱۱ آهنگ تغییر شعاع تماس قطره نسبت به زمان بر روی سطوح با پسماند پایین؛ آزمایش در دو حجم اولیه مختلف قطره آب بر روی سطوح جامد پلکسی گلاس و PMMA انجام شده است .علایم و خطوط پر رنگ به ترتیب به داده‌های تجربی (نتایج این تحقیق و نتایج دیگران) و رابطه (۱۲) از تحقیق حاضر اشاره دارد.

جدول ٤ مقایسه‌ای مابین مقادیر زمان تبخیر محاسبه شده به وسیله روابط توسعه داده شده (۱٤و۹) با مقادیر تجربی
(مراجع داده‌ها در جدول (۳) آمده است)

Solid سطح جامد	R(mm) شعاع تماس	θ (0) زاویه‌تماس تعادلی	 پسرو	τ(min) ثابت‌زمانی	CAH (%) پسماند نسبی	te(min) پسماند بالا رابطه (۹)	 پسماند پایین رابطه (۱٤)	te(min) از آزمایش	Err (%) خطای نسبی رابطه (۹)	 رابطه (۱٤)
SG	۱/٦	٥۸	۱۰	۱۰۱/٥	۸۳	۲۰/٥		۱۹	۸/۲	
Al†	۰/۸۰	٤۱/٦	۱۰	٦۹/۳	۷٦	۸/۱		۷/٥	۸/۳	
Teflon†	۰/۳۹٥	۱۰۲	۲٥	۹/٥٦	۷٥	٥/۱		٥/٥	۷/۳	
CNF	۰/۳۷	۱٥۱	۷۰	٦/۳	٥٤	۱۹/٥		۱٦/۹	۱٥	
CNF	۰/٤۷٤	۱٤٤	۷۰	۱۰/٤	٥۱	۲۱/۹		۲۱/۹	۰	
CNF	۰/٤۷٥	۱٤٥	۷۰	۱۰/٤	٥۲	۲۳/۱		۲۳/۹	۳/۲	
CNF	۰/٥۸	۱٤٤	۷۰	۱٥/٦	٥۱	۳۳/۲		۳۳/٦	۱/۱	
CNF	۰/٦٥	۱٤٤	۷۰	۱۹/٦	٥۱	٤۱/٦		٤۰/٦	۲/۷	
CNF	۰/٦۷	۱٤۷	۷۰	۲۰/۸	٥۲	٥۰/۱		٤٦	۹	
Ref.19*	۰/٦۱٤	۳۰	–	۲٤/٥	-	۲/۸		۲/۳	۲۳	
Ref.19*	۰/٤٦۳	٦۰	-	۱۳/۹	-	۲/۹		۲/۹	۰	
Ref.19*	۰/۳٦۳	۹۰	-	۸/٥	-	۳/٤		۳/۲	٥/۷	
Glass	۰/۹٥	٤۰	-	٤۷/۳	-	٦/٦		٥/٥	۲۰	
ER	۱/٦	٦۱	۲۷	۲۳۷/۷	٥٥/۷	٥۰/٦		٥۱/۲	۱/۱	
ER	۱/۳۸	٦۱	۲۷	۱۷٦/۸	٥٥/۷	۳۷/٦		٤۳/۳	۱۳	
PAMS	۱/٥۳	۸۷	۷٥	۱٦۱/۹	۱۳/۸	٦۰/۳	٥۸/۸	٦۸/۹	۱۲/٤	۱٤/٦
PAMS	۱/۳٤	۸۷	۷٥	۱۲٤	۱۳/۸	٤٦/۲	٤٥	٥۲	۱۱	۱۳/۲
PAMS	۱/۱٦	۸۷	۷٥	۹۳	۱۳/۸	۳٤/٦	۳۳/۸	۳۹	۱۱	۱۳/۳
PAMS	۱	۸۷	۷٥	٦۹	۱۳/۸	۲٥/۷	۲٥/۱	۳۰/۲	۱٤/۷	۱٦/۸
Plexiglas†	۰/٥۷	۷٦/٦	٥۲	٤۲/۲	۳۲	۱۲/٤	۱۰/۱	۱۰	۲٤/۸	۱/۷
PMMA	۱/۲	٦۷	٦۰	۹۹/٦	۱۰		۲۷/۷	۳۰		۷/٦
PMMA	۱/٤	٦۷	٦۰	۱۳٥/٦	۱۰		۳۷/۷	۳۹		۳/۲
PMMA	۱/٦۲	٦۷	٦۰	۱۸۱/٥	۱۰		٥۰/٥	٥۲/٥		۳/۸
PMMA	۱/۸۷	٦۷	٦۰	۲٤۱/۸	۱۰		٦۷/۳	٦۹/٦		۳/۳

*سطح نامشخص　　†مقادیر تجربی تحقیق حاضر

زمان کل تبخیر. جدول (٤) مقادیر زمان کل تبخیر به دست آمده از روابط (۱٤و۹) را با مقادیر تجربی موجود در مراجع مختلف مقایسه می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود هماهنگی بالایی بین نتایج به دست

آمده از این تحقیق با مقادیر تجربی زمان کل تبخیر وجود دارد. برای مقایسه مقدار پسماند سطوح مختلف، پسماند نسبی را به صورت $CAH = \frac{(\theta_e - \theta_r)}{\theta_e}$ تعریف می‌کنیم؛ برای سطح ایده‌آل که پسماند زاویه تماس ندارد، مقدار آن صفر است و هرچه قدر پسماند زاویه تماس بیشتر باشد، مقدار CAH افزایش می‌یابد.

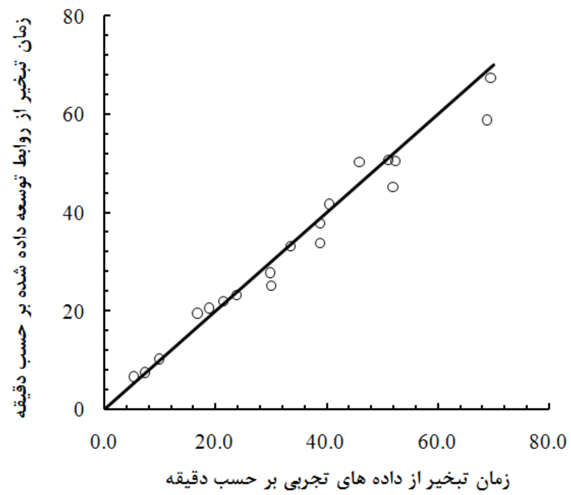
بر حسب این که سطح مورد بررسی دارای پسماند بالا یا پایین باشد می‌توان به ترتیب یکی از دو رابطه (۱٤یا۹) را برگزید. خطای نسبی مابین مقادیر زمان کل تبخیر در بیش از ۹۰٪ موارد زیر ۱۵٪ است که بیانگر دقت خوب روابط ارایه شده است. مشاهده می‌شود برای سطوحی که مقدار پسماند نسبی آنها بالا باشد (CAH>50)، رابطه (۹) مقادیر زمان تبخیر را به خوبی پیش‌بینی می‌کند در حالی که رابطه (۱٤) برای سطوح با پسماند نسبی بسیار پایین(CAH<10) مفید است. برای سطوحی که دارای مقادیر پسماند نسبی متوسط باشند (10<CAH<50) از هردو رابطه (۱٤و۹) می‌توان بهره برد؛ ولی در این حالت نتایج تقریبی خواهد بود. بنابراین برای بسیاری از سطوح با صرف نظر کردن از مراحل دیگر تبخیر و در نظرگرفتن کل فرآیند تبخیر در یک مرحله، می‌توان دینامیک تبخیر قطره را پیش‌بینی کرد. یک نمایش بهتر از دقت روابط ارایه شده را می‌توان در نمودار شکل (۱۲) مشاهده کرد که در آن مقادیر تجربی مدت زمان تبخیر قطره با مقادیر حاصل از روابط ارایه شده، برای سطوح مختلف نسبت به خط ٤۵ درجه مقایسه می‌شوند. هرچه قدر مقادیر به خط ٤۵ درجه نزدیکتر باشند، به این معنی است که روابط ارایه شده دارای دقت بالاتری هستند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اکثر موارد، نقاط بر روی خط ٤۵ درجه قرار می‌گیرد که بیانگر مطابقت پیش‌بینی تحقیق حاضر با مقادیر تجربی مدت زمان کل تبخیر قطره بر روی سطح است. طبق دو رابطه (۱٤و۹)، زمان تبخیر قطره برای هر یک از دو سطح با پسماند بالا یا پایین با τ رابطه مستقیم دارد. یعنی:

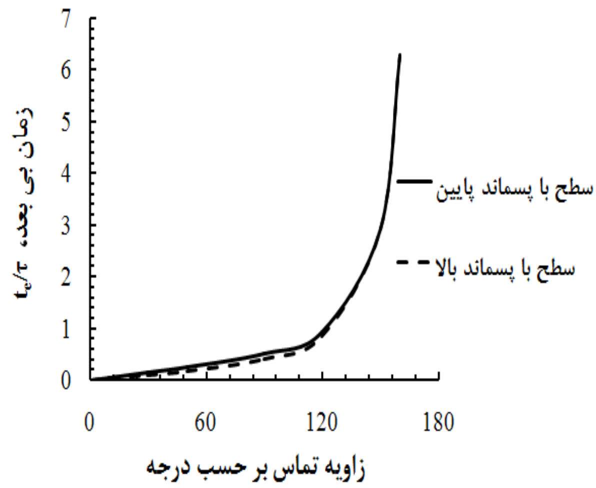
$$t_e \propto \frac{\rho R^2}{D(c_s - c_0)} = \frac{\rho R^2}{Dc_s(1-\Phi)} \qquad (۱۵)$$

طبق رابطه (۱۵) با افزایش شعاع تماس اولیه قطره (افزایش حجم)، زمان تبخیر قطره افزایش می‌یابد که بدیهی است. کاهش رطوبت نسبی محیط منجر به کاهش زمان تبخیر قطره می‌شود؛ این موضوع به این دلیل است که با کاهش رطوبت نسبی محیط، گرادیان غلظت بخار از قطره به محیط افزایش یافته و در نتیجه باعث افزایش نرخ تبخیر قطره می‌شود.

شکل (۱۳)، زمان کل تبخیر قطره که نسبت به ثابت زمانی بی بعد شده را نسبت به زاویه تماس نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد برای محاسبه زمان کل تبخیر، طبق رابطه (۱٤و۹)، از مقادیر زاویه تماس تعادلی و پسرو به ترتیب برای سطوح با پسماند بالا و پایین استفاده می‌شود. همان‌طور که از شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود، مقادیر زمان تبخیر قطره در یک شعاع تماس معین برای یک سطح مشخص ولی با پسماند پایین و بالا در صورتی برابر است که زاویه تماس تعادلی با زاویه تماس پسرو یکسان باشد. ولی همان‌طور که ذکر شد زاویه تماس تعادلی با زاویه تماس پسرو به دلیل زبری و غیریک‌نواختی سطح متفاوت است و عملاً از لحاظ فیزیکی هیچ وقت این دو زاویه برابر نمی‌شوند. از این موضوع می‌توان به منشأ اختلاف رفتار قطره بر روی سطوح مختلف پی برد.



شکل ۱۲ مقایسه مقادیر تجربی زمان تبخیر قطره با مقادیر حاصل از روابط توسعه داده شده



شکل ۱۳ تغییرات زمان بی بعد نسبت به زاویه تماس

جمع‌بندی

در این مقاله، دینامیک تبخیر قطره بر روی سطوح مختلف به صورت تجربی و تئوری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که قطره در طی فرآیند تبخیر بر روی سطوح با پسماند بالا و پایین رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهد؛ بدین ترتیب که بر روی سطوح با پسماند بالا، فرآیند تبخیر در سطح تماس ثابت صورت می‌گیرد و این در حالی است که تبخیر قطره بر روی سطوح با پسماند پایین با کاهش زاویه تماس انجام می‌شود. با استفاده از این ایده، معادله حاکم بر تبخیر قطره با فرض یک مرحله بودن تبخیر قطره و با صرف نظر از مراحل دیگر برای هر یک از دو سطح با پسماند بالا و پایین به طور جداگانه حل شدند. آهنگ تغییر شعاع تماس و زاویه تماس قطره نسبت به زمان برای هر یک از سطوح با پسماند بالا و پایین به صورت تحلیلی به دست آمده و با مقادیر تجربی مقایسه شد. هماهنگی بالایی بین نتایج حاصل از مدل تحلیلی با مقادیر تجربی مشاهده گردید

که اعتبار مدل ارایه شده را تأیید کرد. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل در نظر گرفته شده به خوبی می‌تواند دینامیک تبخیر قطره برای سطوح مختلف را پیش‌بینی کند.

فهرست علایم و نشانه‌ها

حروف انگلیسی

پسماند زاویه تماس	CAH
غلظت بخار	c
ضریب نفوذ	D
شعاع تماس	R
زمان	t
طول موئینگی	L
حجم قطره	V

حروف یونانی

رطوبت نسبی	Φ
زاویه تماس	θ
ثابت زمانی	τ
کشش سطحی	γ

زیرنویس

پیشرو	a
تعادلی/ تبخیر	e
پسماند بالا	h
پسماند پایین	ℓ
پسرو	r
محیط	o
سطح	s

تشکر و قدردانی

از مساعدت و همکاری مهندس سینا علوی و مهندس علی کاظمی در انجام آزمایش‌ها صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

مراجع

1. Dugas, V., Broutin, J. and Souteyrand, E., "Droplet evaporation study applied to DNA chip manufacturing", *Langmuir*, Vol. 21, pp. 9130–9136, (2005).
2. Kim, J.H., Wei-Xian, R.G. and Larson, S., "Methods of stretching DNA molecules using flow fields", *Langmuir*, Vol. 23, pp. 755–764, (2007).
3. Kim, H. and Kim, J., "Evaporation characteristics of a hydrophilic surface with micro-scale and/or nano-scale structures fabricated by sandblasting and aluminum anodization", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, 045008, (2010).
4. Hung, Y.M. and Seng Q., "Effects of geometric design on thermal performance of star-groove micro-heat pipes", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 1198-1209, (2011).

5. Ko, S.H, Chung, J., Hotz, N., Nam, K.H. and Grigoropoulos, C.P., "Metal nanoparticle direct inkjet printing for low-temperature 3D micro metal structure fabrication", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, 125010, (2010).
6. Schirmer, N.C., Ströhle, S., Tiwari, M.K. and Poulikakos, D., "On the principles of printing sub-micrometer 3D structures from dielectric-liquid-based colloids", *Advanced Functional Materials*, Vol. 21, pp. 388–395, (2011).
7. Peng, D., Luhai, L., Wen, Z., Xian, L. and Xuwei, H., "Study on the printing performance of coated paper Inkjet Ink", *Advances in Materials Research*, Vol. 174, pp. 358–361, (2011).
8. De Gans, B., Duineveld, P.C. and Schubert U.S., "Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments", *Advanced Material*, Vol. 16, pp. 203–213, (2004).
9. Fuller, S.B., Wilhelm, E.J. and Jacobson, J.M., "Ink-Jet printed nano particle micro electromechanical systems", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, pp. 54–60, (2002).
10. Campbell, P.G. and Weiss L.E.,"Tissue engineering with the aid of inkjet printers", *Expert Opinion on Biological Therapy*, Vol. 7, pp. 1123–1127, (2007).
11. Bourges-Monnier, C. and Shanahan, M.E.R.,"Influence of evaporation on contact angle", *Langmuir*, Vol. 11, pp. 2820–2829, (1995).
12. Sefiane, K. and Tadrist, L.,"Experimental investigation of the de-pinning phenomenon on rough surfaces of volatile drops", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp.482–490, (2006).
13. Hu, H. and Larson, R.G.,"Evaporation of a Sessile Droplet on a Substrate", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 106, pp. 1334-1344, (2002).
14. Hu, H. and Larson, R.G., "Marangoni Effect Reverses Coffee-Ring Depositions", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp.7090-7094, (2006).
15. Elperin, T., Fominykh, A. and Krasovitov, B., "Evaporation and Condensation of Large Droplets in the Presence of Inert Admixtures Containing Soluble Gas", *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 64, pp. 983-995, (2007).
16. Shahidzadeh-Bonn, N., Rafa, S., Azouni, A. and Bonn, D., "Evaporating droplets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 549, pp. 307–313, (2006).
17. Kim, J., Ahn, S., Kim, J.H. and Zin, W., "Evaporation of Water Droplets on Polymer Surfaces", *Langmuir*, Vol. 23, pp. 6163-6169, (2007).
18. Lee, K.S., Cheah, C.Y., Copleston, R.J., Starov, V.M. and Sefiane, K., "Spreading and evaporation of sessile droplets: Universal behaviour in the case of complete wetting",*Colloids and Surfaces A:*

Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 323, pp. 63–72, (2008).

19. Schnfeld, F., Graf, K., Hardt, S. and Butt, H., "Evaporation dynamics of sessile liquid drops in still air with constant contact radius", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 3696–3699, (2008).
20. Dunna, G.J., Wilson, S.K., Duffy, B.R., David, S. and Sefiane, K., "A mathematical model for the evaporation of a thin sessile liquid droplet: Comparison between experiment and theory", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 323, pp. 50–55, (2008).
21. Kulinich, S.A. and Farzaneh, M., "Effect of contact angle hysteresis on water droplet evaporation from super-hydrophobic surfaces", *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 4056–4060, (2009).
22. Shin, D.H., Lee, S.H., Jung, J. and Yoo, J.Y., "Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces", *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, pp. 1350–1353, (2009).
23. Guilizzoni, M. and Sotgia, G., "Experimental analysis on the shape and evaporation of water drops on high effusivity, microfinned surfaces", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp. 93–103, (2010).
24. Gelderblom, H.,Varo, G.M., Nair, H., Houselt, A., Lefferts, L., Snoeijer, J.H. and Detlef, L., "How water droplets evaporate on a superhydrophobic substrate", *Physical Review E*, Vol. 83, 026306(1-6), (2011).
25. Bormashenko, E., Musin, A. and Zinigrad, M., "Evaporation of droplets on strongly and weakly pinning surfaces and dynamics of the triple line", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 385, pp. 235– 240, (2011).
26. Semenov, S., Starov, V.M., Rubio, R.G., Agogo, H. and Velarde, M.G., "Evaporation of sessile water droplets: Universal behaviour in presence of contact angle hysteresis", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*,Vol. 391, pp. 135-144, (2011).
27. Bourgks-Monnier, C. and Shanahan, M.E.R., "Influence of Evaporation on Contact Angle", *Langmuir*, Vol. 11, pp. 2820-2829, (1995).
28. http://rsbweb.nih.gov/ij/, (23.09.2011).
29. Picknett, R.G. and Bexon, R., "The evaporation of sessile or pendant drops in still air", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 61, pp. 336–350, (1977).
30. Girard, F., Antoni, M. and Sefiane, K., "On the effect of marangoni flow on evaporation rates of heated water drops", *Langmuir*, Vol. 24, pp. 9207–9210, (2008).
31. Popov, Y.O., "Evaporative deposition patterns: spatial dimensions of the deposit", *Physical Review*

E, Vol. 71, 036313(1-17), (2005).

32. Girard, F., Antoni, M., Faure, S. and Steinchen, A., "Evaporation and marangoni driven convection in small heated water droplets", *Langmuir*, Vol. 22, pp. 11085–11091, (2006).
33. Girard, F., Antoni, M., Faure, S. and Steinchen, A., "Influence of heating temperature and relative humidity in the evaporation of pinned droplets", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 323, pp. 36–49, (2008).
34. Girard, F. and Antoni, M., "Influence of substrate heating on the evaporation dynamics of pinned water droplets", *Langmuir*, Vol. 24, pp. 11342–11345, (2008).
35. Foister, R.T., "The Kinetics of Displacement Wetting in Liquid/Liquid/Solid Systems", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 136, No. 1, (1990).